

해양플랜트에 병렬 계류된 LNG 운반선의 거동에 슬로싱이 미치는 영향

이승재*

*미국선급협회

The Effects of Sloshing on the Responses of an LNG Carrier Moored in a Side-by-side Configuration with an Offshore Plant

Seung Jae Lee*

*American Bureau of Shipping, Houston, America

KEY WORDS: Sloshing 슬로싱, Global motion 거시적 운동, Coupled dynamic analysis 동적 연성 해석, Time domain potential-viscous hybrid method 시간영역 포텐셜-점성 혼합 방법

ABSTRACT: During the loading/offloading operation of a liquefied natural gas carrier (LNGC) that is moored in a side-by-side configuration with an offshore plant, sloshing that occurs due to the partially filled LNG tank and the interactive effect between the two floating bodies are important factors that affect safety and operability. Therefore, a time-domain software program, called CHARM3D, was developed to consider the interactions between sloshing and the motion of a floating body, as well as the interactions between multiple bodies using the potential-viscous hybrid method. For the simulation of a floating body in the time domain, hydrodynamic coefficients and wave forces were calculated in the frequency domain using the 3D radiation/diffraction panel program based on potential theory. The calculated values were used for the simulation of a floating body in the time domain by convolution integrals. The liquid sloshing in the inner tanks is solved by the 3D-FDM Navier-Stokes solver that includes the consideration of free-surface non-linearity through the SURF scheme. The computed sloshing forces and moments were fed into the time integration of the ship's motion, and the updated motion was, in turn, used as the excitation force for liquid sloshing, which is repeated for the ensuing time steps. For comparison, a sloshing motion coupled analysis program based on linear potential theory in the frequency domain was developed. The computer programs that were developed were applied to the side-by-side offloading operation between the offshore plant and the LNGC. The frequency-domain results reproduced the coupling effects qualitatively, but, in general, the peaks were over-predicted compared to experimental and time-domain results. The interactive effects between the sloshing liquid and the motion of the vessel can be intensified further in the case of multiple floating bodies.

1. 서 론

통상적인 부유체의 거동해석에 있어서, 내부 자유표면(Inner free surface)의 효과는 일반적으로 미미한 것으로 고려되어 왔다. 그러나 최근의 실험 및 수치계산에 의한 연구에 따르면 액체화물에 의한 슬로싱 현상과 LNG 운반선의 운동 연성효과가 탱크 내 화물이 부분적으로 적재되었을 경우, 특정 주파수에서 두드러진 것으로 나타났다(Kim et al., 2007; Lee, 2007). 이는 LNG 생산 사이트(Site)에서 LNG FPSO/FSRU와 같은 해양플랜트에 LNG 운반선이 근접하여 운항 및 하역작업을 할 때 안전과 관련된 중요한 문제로 직결된다. 또한 이러한 슬로싱과 부유체 운동의 연성효과는 해양플랜트와 LNG 운반선의 규모가 점차 대형화되고 있는 해양 에너지 시장의 요구와 맞물려 보다 중요한 문제로 인식되고 있다.

부유체의 운동과 슬로싱의 연성에 관한 연구는, Molin et al.

(2002), Malenica et al.(2003), 그리고 Newman(2005)에 의해 선형포텐셜 이론을 바탕으로 한 주파수 영역에서 이루어진 바 있다. 시간영역에서는 Kim et al.(2003; 2007)이 2차원과 3차원 점성 유한차분법 슬로싱 프로그램을 사용하여 수행하였다. 또한 Lee et al.(2007)은 선박의 Roll 운동에 있어 여러 탱크내의 슬로싱에 의한 연성효과를 연구하였으며, 이 연구는 본 논문에서 두 부유체 상호 간섭을 고려한 연구로 확장되고 있다. Cho et al. (2009)은 병렬 계류된 LNGC와 LNG FSRU의 슬로싱 연성효과를 시간영역에서 수치적으로 계산한 바 있다. 본 연구에서는 포텐셜 문제와 점성효과를 동시에 고려한 형태의 방법을 사용해, 시간영역에서 두 부유체의 상호 간섭과 두개의 탱크내의 슬로싱 문제 해석 결과를 연성하고, 이를 별도로 개발된 주파수 영역에서의 계산결과와 비교하였다. 시간영역에서 부유체의 운동은 선형포텐셜 이론과 3차원 패널법을 사용하여 주파수 영역에서 계산한 뒤 시간영역으로 변환하고, 탱크내부의 슬로싱 문제

교신저자 이승재: 16855 Northchase Dr., Houston, 77060, sjlee@eagle.org

본 연구는 2008년 제주도에서 개최된 International Workshop on Water Waves and Floating Bodies에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

는 3차원 유한차분법을 이용해서 Navier stokes 방정식을 풀게 된다. 이때 액체화물의 자유표면은 비선형 SURF 방법을 이용하여 결정짓는다. 단, 문제를 단순화하기 위하여 슬로싱 계산에서 자유표면은 수직방향으로 단일값을 가진다는 가정을 하여, 오버터닝 (Overturning)이나 분무 (Particle splash)와 같은 과도한 자유표면의 거동은 고려하지 않는다. 이렇게 계산된 결과와의 비교를 위하여, 주파수 영역에서 선형포텐셜을 이용한 해법을 따로 개발하여, 유체의 거동이 작다는 가정 하에 같은 계산을 수행하였다. 탱크 내 유체의 거동이 과도하지 않은 경우에 점성효과는 무시할 수 있을 것이므로, 두 방법은 유사한 연성효과를 보일 것이다.

본 연구에서 부유체와 액체화물의 운동은 운동학적(Kinematic) 그리고 동적인(Dynamic) 관계를 이용하여 시간영역에서 연성되어 계산된다. 이 때 슬로싱으로 인한 하중은 부유체의 운동에 영향을 미치게 되며 계산된 부유체의 운동은 액체화물의 슬로싱을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 모두 모형 실험결과와 비교하였다. 모형실험은 SALT JIP(Gaillarde et al., 2004)의 일 부분으로써 MARIN에 의해 수행되었으며 수치계산결과는 실험으로부터 측정된 데이터와 비교하여, 양호한 결과를 얻었다.

먼저 하나의 단일 부유체의 경우에 대한 계산을 수행하여 이를 실험결과와의 비교를 한 후, 부유체와 액체화물과의 상호 간섭효과는 하역작업을 위해 해양플랜트에 병렬계류(Side-by-side)된 LNG 운반선의 경우로 확장시켜 계산을 행한다. 이때 LNG 운반선의 운동은 두개의 부유체의 상호간섭 효과에 의해 커질 수 있고 이는 탱크내의 액체유동을 더욱 가진 시키게 된다. 또한 이러한 상호간섭 효과는 향파(Head sea) 상태에서도 LNG 운반선의 Roll 운동을 야기하게 되며 이는 선박이 기하학적으로 좌우 대칭인 것을 생각하면 단일 부유체에서는 발생하지 않는 현상이다. 따라서 하역작업 중인 해양플랜트와 LNG 운반선의 병렬계류 상태에서는 부유체의 운동과 슬로싱간의 상호작용에 의한 효과는 보다 크게 나타날 것으로 예상된다.

2. 시간영역에서의 해석법

2.1 부유체의 운동

유체 중에 떠 있는 부유체가 동요되면, 생성된 파도는 시간이 지남에 따라 부유체로부터 멀어져 나간다. 이러한 파도는 연속적으로 부유체의 압력장에 영향을 미치게 되어 부유체가 받는 힘에도 영향을 주게 된다. 이러한 시간기억효과(Time memory effect)는 발산포텐셜(Radiation potential)을 이용해 시간영역에서 고려해지게 되는데, 식 (1)과 같이 부유체에 작용하는 힘은 컨볼루션 적분을 포함하는 형태로 표현할 수 있다.

$$F_R = -m(\infty)\ddot{\zeta} - \int_{-\infty}^t R(t-\tau)\dot{\zeta}d\tau \quad (1)$$

여기서 $m(\infty)$ 는 무한주파수에서의 부가질량(Added mass), $\ddot{\zeta}$ 와 $\dot{\zeta}$ 는 운동변위의 가속도와 속도를 나타낸다. 두 번째 항인 컨볼루션 적분은 시간 t 이전에 발생한 부유체의 운동에 의해 부유체에 작용하는 파력의 기억효과를 나타낸다. $R(t)$ 는 지연함수

(Retardation function) 이라고 불리며, 주파수 영역에서의 조파감쇄력으로부터 계산할 수 있다. 식 $R(t)$ 를 다시 표현하면,

$$R(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b(\omega)\cos(\omega t)d\omega \quad (2)$$

$b(\omega)$ 는 각 주파수에서의 조파감쇄계수이다. 본 연구에서는 두 부유체의 운동방정식에 필요한 12×12 의 조파감쇄계수에 대응하는 각각의 지연함수를 계산하게 된다. 식 (1)의 $m(\infty)$ 는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$m(\infty) = m^a(\omega) + \int_0^\infty R(t) \frac{\sin\omega t}{\omega} dt \quad (3)$$

이 때 $m^a(\omega)$ 는 주파수 ω 에서의 부가질량이다. 이렇게 구해진 부가질량력, 조파감쇄력, 그리고 입사파력을 포함해서 최종적인 포텐셜에 의한 유체력을 표현한다. 시간영역에서 천천히 변화하는 부유체의 운동을 계산하기 위해서는 Newman의 근사법이 사용되었으며, 이는 2차 차주파수(Difference frequency) 파력의 2차 전달함수(Quadratic transfer functions, QTFs)를 대각선항들에 사용해 평균표류력과 모멘트으로써 근사하는 방법이다. 이러한 근사는 본 연구에서 고려하고 있는 계류시스템의 평면운동과 같이 시스템의 고유주파수가 아주 작은 경우에 유효하게 적용될 수 있다.

2.2 슬로싱 문제

시간영역에서 액체화물의 슬로싱은 Navier stokes 방정식을 풀어 해석한다. 개발된 프로그램 ABSLO3D(Kim, 2001)은 3차원 탱크의 슬로싱을 복수개의 탱크에 대해 동시에 풀 수 있다. 강제동요 하에 있는 부분적으로 차 있는 액체탱크의 슬로싱 현상을 해석하기 위해 두개의 좌표계를 사용한다. 탱크고정좌표계는 탱크바닥의 중심에 위치하고, 이는 선체운동의 중심 G에 대해 회전운동을 한다. 또 다른 Cartesian 좌표계(X, Y, Z)는 선체 질량중심인 G에 위치하고, 이는 \vec{U} 의 속도 벡터를 가지고 병진운동을 한다. 비압축성 유체를 가정하여 탱크 내 유체의 지배방정식은 식 (4)와 (5)와 같은 연속방정식과 Navier stokes 방정식이 된다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{F} \quad (5)$$

여기서 \vec{u} 는 탱크고정 좌표계에서 정의되는 속도 벡터(u_x, u_y, u_z)이다. ρ, ν, p, \vec{F} 는 각각 액체밀도, 동점성계수, 압력, 그리고 외력벡터이다. 또한 D/Dt 는 전미분계수를 나타낸다.

외력은 중력과 병진 및 회전운동의 관성력으로 구성되며, 외력벡터 \vec{F} 는 다음과 같다.

$$\vec{F} = \vec{g} - \frac{d\vec{U}}{dt} - \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times (\vec{r} - \vec{R}) - 2\vec{\Omega} \times \frac{d(\vec{r} - \vec{R})}{dt} - \vec{\Omega} \times \{ \vec{\Omega} \times (\vec{r} - \vec{R}) \} \quad (6)$$

여기서 \vec{g} 와 $\vec{\Omega}$ 는 중력벡터와 회전속도벡터이다. 또한 \vec{r} 과 \vec{R} 는

관심지점과 선체질량중심 G의 위치벡터이다. 우변의 두번째 항은 병진운동의 관성이며, 세번째, 네번째, 다섯번째는 회전운동과 관련된 힘들로서, 각각 각가속도, 코리올리(Coriolis) 힘, 원심력을 나타낸다. 이 때 이 힘들은 탱크고정 좌표계에서 표현된다.

자유표면경계에서는 다음과 같은 운동학 및 동적인 경계조건을 만족해야한다.

$$\frac{D\vec{r}_f}{Dt} = \vec{u}_f \quad (7)$$

$$p_f = p_{atm} \quad (8)$$

여기서 아래첨자 f 는 자유표면에서의 값을 나타내고, p_{atm} 는 탱크내부의 대기압 또는 Ullage 압력을 나타낸다.

본 연구는 단순화된 슬로싱 문제를 다루고 있어 스플래싱(Splashing)이나 브레이킹(Breaking)과 같은 과도한 액체화물의 거동을 고려하지 않기로 한다. 잘 알려진 바와 같이 가진 주파수가 탱크 내 액체의 공진 주파수와 비슷할 경우, 액체화물의 움직임은 강한 비선형을 거동을 가지게 되고 이러한 비선형 거동은 쇄파(Wave breaking), 분무(Particle splash), 제트 흐름(Jet flow), 그리고 유체충격현상까지 포함한다. 이러한 복잡한 국부적인 현상을 모두 고려하기는 어려운 점이 많고, 무엇보다 그러한 국부적인 유체현상은 탱크벽이나 내부 구조물의 구조손상에는 중요한 현상일 수 있으나 본 연구의 목적인 거시적 부유체의 운동 관점에서는 크게 중요하지 않다. 이러한 점을 고려하여, 자유표면은 단일값을 가지는 함수로 표현하며 운동학적 자유표면 경계조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \eta = 0 \quad (9)$$

η 는 자유표면의 높이를 나타낸다.

2.3 부유체의 운동과 슬로싱의 시간영역에서의 연성

슬로싱과 부유체 운동의 연성은 식 (10)과 같이 슬로싱에 의한 힘 벡터를 부유체 운동방정식의 외력에 더함으로써 이루어진다.

$$\vec{F}(t) = \vec{F}_{ext}(t) + \vec{F}_{slosh}(t) \quad (10)$$

$\vec{F}_{ext}(t)$ 는 파도와 유체동역학적 반작용에 의해 부유체의 표면에 작용하는 외부가진력이며, $\vec{F}_{slosh}(t)$ 는 슬로싱에 의해 탱크 내부에 작용하는 힘이다. 부유체의 운동방정식에 사용될 질량행렬 $[M_{ij}]$ 은 탱크 내부의 유체 질량을 포함한 선체의 질량을 나타내고, 질량과 유체정역학적 힘들은 각각 다른 액체화물의 양을 고려하여 수정을 가한다. 유체질량에 의한 관성력을 살펴보면, 먼저 유체질량이 포함된 질량행렬 $[M_{ij}]$ 에 의해 계산된 관성력을 생각할 수 있고, 다음으로 슬로싱 프로그램에서 계산된 힘역시 유체질량에 의한 관성력을 포함하고 있다. 따라서 중복된 유체질량에 의한 관성력을 상쇄시켜줄 필요가 있으며, 이는 식 (11)과 같이 유체질량만큼의 관성력을 더해줌으로써 가능하다.

$$\vec{F}_{slosh}(t) = \vec{F}_{int}(t) + (m_{tank,ij}) \frac{\partial^2 \vec{\zeta}}{\partial t^2} \quad (11)$$

$\vec{\zeta}$ 는 부유체의 운동벡터, $[m_{tank,ij}]$ 는 액체화물의 질량행렬, 그리고 $\vec{F}_{int}(t)$ 는 슬로싱 프로그램에 의해 계산된 힘 벡터이며, 이는 유체의 거동에 의한 유체정역학 및 동역학적 힘을 포함하고 있다.

3. 수치계산 결과와 해석

본 연구에서는 바지(Barge)형태의 해양플랜트 그리고 두 개의 액체화물탱크를 가진 LNG 운반선의 상호간섭 효과를 고려한다. Fig. 1은 병렬계류 형태로 배치된 두 부유체의 유체력 계산에 사용된 패널을 나타내고 있다. 해양플랜트와 LNG 운반선의 특징적인 주요제원은 Table 1에 나타나 있다. LNG 운반선은 두 개의 직각형의 탱크를 가지고 있다. 두 탱크의 제원은 Table 2에 정리되어 있다. 시뮬레이션은 수심 100m에 대해 수행되었으며, 시뮬레이션의 외력조건은 Table 3에 표시되어 있다. 본 연구는 주파수영역과 시간영역에서의 계산결과를 비교하는 것이 목적이므로, 바람과 조류는 고려하지 않았다.

두 부유체의 발산/산란(Radiation/diffraction) 문제해석은 WAMIT(Lee, 1995)을 사용하였으며, 이는 부가질량과 조파감쇄계수, 운동 RAO(Response amplitude operator), 파랑강제력의 LTF(Linear transfer function), 그리고, 2차 평균 표류력을 포함한다. 앞서 설명한 바와 같이 주파수영역에서의 방정식을 푸러

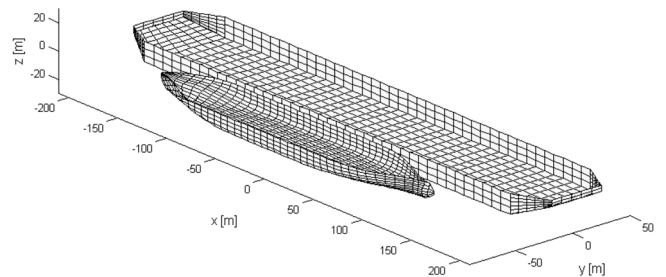


Fig. 1 Grid generation of hulls for 3D panel method (Number of panels = 1754)

Table 1 Principal particulars of floating terminal and LNGC

| Description | Unit | Floating terminal | LNGC |
|--------------|------|-------------------|-----------|
| Length | m | 428.0 | 270.0 |
| Breadth | m | 70.0 | 43.4 |
| Draught | m | 14.5 | 11.916 |
| Displacement | ton | 418,429.5 | 102,591.0 |
| LCG | m | 214.0 | 134.878 |
| VCG | m | 10.4 | 4.43 |
| kxx | m | 24.5 | 15.703 |
| kyy | m | 107.0 | 67.5 |
| kzz | m | 107.0 | 69.302 |

Table 2 Characteristics of sloshing tanks

| Designation | Magnitude |
|---|-----------|
| AFT TANK no. 4 (Inner dimensions given) | |
| Tank center from aft perpendicular | 80.27 m |
| Tank bottom from keel line | 2.60 m |
| Tank length | 40.04 m |
| Tank breadth | 35.69 m |
| Tank height | 26.30 m |
| FORWARD TANK no. 2 (Inner dimensions given) | |
| Tank center from aft perpendicular | 174.29 m |
| Tank bottom from keel line | 2.60 m |
| Tank length | 45.48 m |
| Tank breadth | 35.75 m |
| Tank height | 26.30 m |

Table 3 Simulation environment

| | | |
|---------|------------------------------|---------|
| Wind | N/A | |
| Current | N/A | |
| Wave | Heading [deg] | 90, 180 |
| | Significant height [m] | 2.0 |
| | Peak period [sec] | 13 |
| | γ of JONSWAP spectrum | 3.0 |

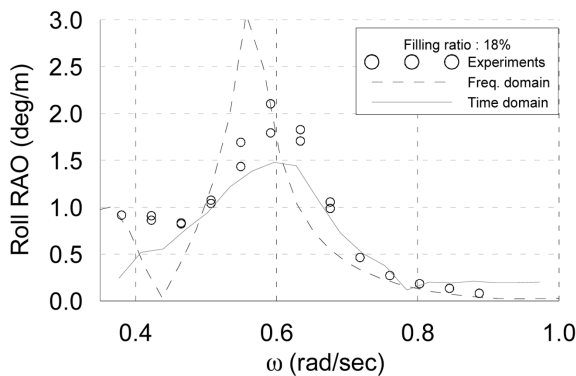


Fig. 2 Motion-sloshing coupling effect of MARIN FPSO in roll (Wave heading = 90 deg.)

에 변환한 후, 컨볼루션 적분을 포함하는 시간영역에서의 방정식을 구성한다. 천천히 변하는 표류력은 Newman의 가정을 이용해서 계산한다. 주파수 영역에서 동적유체력의 계산결과를 검증하기 위하여, 본 연구의 대상인 해양플랜트와 같은 형태의 바지선(길이 285m, 폭 63m, 흘수 13m)의 운동 RAO를 MARIN FPSO의 실험결과와 비교하여, 검증하였다(Lee, 2007). Fig. 2는 슬로싱이 MARIN FPSO의 Roll 운동에 미치는 영향을 나타낸다. 액체화물의 양은 탱크높이의 18%일 때이며, 본 연구에서 제안하고 있는 점성과 포텐셜 문제를 함께 고려한 시간영역에서의 계산방법이 수치계산 결과가 포텐셜 이론만을 이용한 주파수 영역에서의 계산결과에 비해 실험결과를 보다 정확하게 예

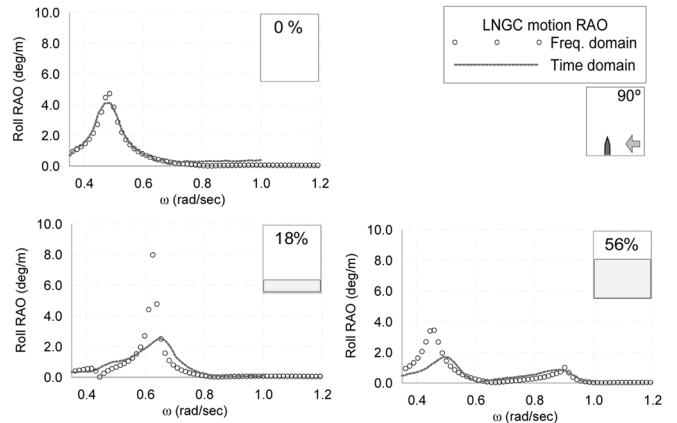


Fig. 3 Motion-sloshing coupling effect of roll RAO (LNG only, wave heading = 90 deg.)

측하고 있음을 보여준다.

이제 Fig. 1과 같은 해양플랜트와 LNG 운반선의 병렬계류 배치에서의 슬로싱 효과를 살펴보고자 하자. 먼저, LNG 운반선 단독으로 횡파조건(Beam sea condition)에 있을 경우에 대한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 주파수 영역에서의 연성효과는 슬로싱 액체의 부가질량을 LNG 운반선의 부가질량을 더하고 액체화물의 내부자유표면에 의한 유체정역학적 복원력의 효과를 고려해서 계산하였다. 반면 시간영역에서의 계산은 다물체-슬로싱 연성 모듈이 추가된 CHARM3D(시간영역 선박운동 프로그램, Kim et al., 1999)와 ABSLO3D(시간영역 슬로싱 프로그램, Kim, 2001)를 연성하여 수행하였다. 액체화물이 없는 경우, 주파수 영역과 시간영역의 결과는 아주 잘 일치하며, Roll 고유주기는 0.47rad/s로 나타났다. 액체화물이 18%일 경우, Roll 운동의 크기는 줄어들고, 고유주기는 0.72rad/s로 이동하였다. 이때 주파수 영역에서의 계산결과가 다소 과도하게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 점성효과와 비선형 슬로싱 효과를 무시하였기 때문이다. 액체화물의 높이가 56%일 경우, 운동 RAO의 피크가 두개가 관찰되었고, 그 중 높은 주파수의 피크는 0.9rad/s에서 나타났다. 이때 두 피크의 크기는 18%의 경우에 비해 줄어들었음을 볼 수 있다. 이 시간영역에서의 운동 RAO는 입사파 스펙트럼과 시간이력(Time history)으로 부터 생성된 Roll 응답 스펙트럼의 비율을 가지고 계산하였다. 액체 탱크 내 슬로싱의 Roll 방향의 가장 낮은 고유주기를 계산해보면 18%의 경우는 0.58rad/s, 그리고 56%의 경우는 0.86rad/s이다.

다음으로 LNG 운반선이 해양플랜트에 계류되어 있는 상태에서 횡파중에 있는 경우에 대한 계산결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 해양플랜트와 LNG 운반선은 선형 스프링으로 연결되어 있으며 부유체에 연결된 surge, sway, yaw 방향의 스프링계수는 Table 4와 같다. Fig. 3과 Fig. 6의 비교를 통하여, 병렬계류상태에서 하역작업시의 두 부유체의 상호간섭 현상을 관찰할 수 있다. 슬로싱과 점성효과를 고려하지 않은 경우, 시간영역과 주파수영역에서의 두 계산은 정확히 같은 RAO를 생성함을 확인하였다. Fig. 4와 같이 정현파 시험(Regular wave test)를 통해 시간영역에서의 계산결과가 주파수 영역에서의 계산된 값을 정확

Table 4 Stiffness of linear spring for mooring system

| | LNGC | FT |
|-------------|----------|----------|
| Surge [N/m] | 0.11E+08 | 0.44E+10 |
| Sway [N/m] | 0.21E+08 | 0.71E+10 |
| Yaw [N*m] | 0.36E+11 | 0.33E+12 |

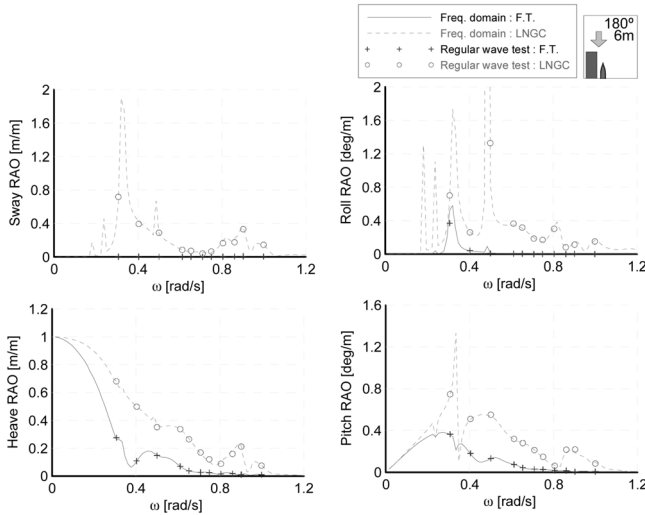


Fig. 4 Regular wave test in time domain

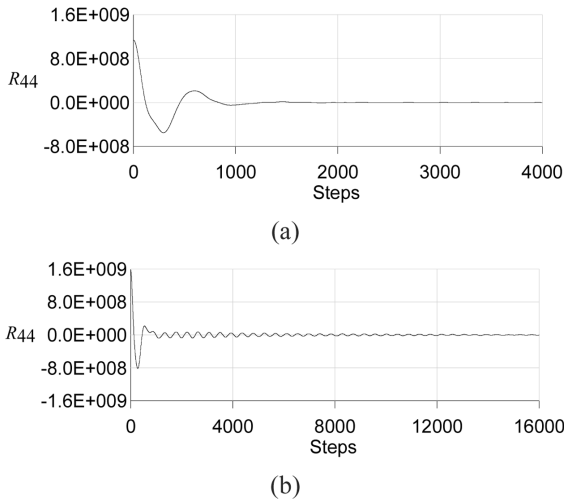


Fig. 5 Example of roll retardation function for (a) single body (b) two body case

히 예측하고 있음을 알 수 있다.

다물체의 경우, 이 연구에서는 두 물체간의 부가적인 공진현상에 의해, 보다 높은 피크들이 나타나게 되고, 시간영역에서의 컨볼루션 적분의 수렴이 단일체의 경우에 비해 시간이 많이 걸리게 된다. 즉 지연함수(Retardation function)의 길이가 단일체의 경우에 비해 더 길어지게 되며, 그 예가 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5의 (a)는 단일체의 경우 지연함수의 길이를 나타내고, (b)는 두 부유체가 있을 경우인데, (b)의 경우 지연함수의 길이가 더 길어져야 수렴값을 가지게 됨을 관찰할 수 있다. 주파수

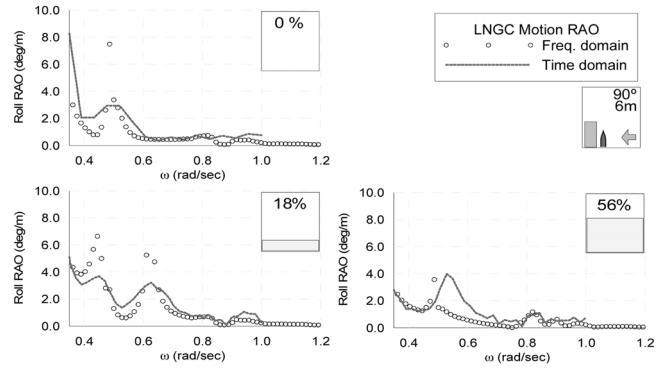


Fig. 6 Motion-sloshing coupling effect of roll RAO (LNGC with FT, Wave heading = 90 deg.)

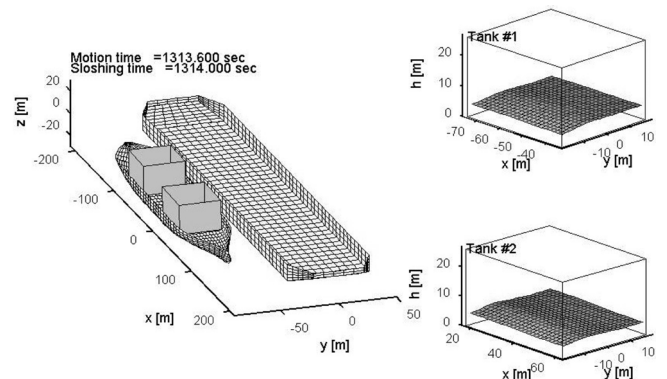


Fig. 7 Snapshot of motion-sloshing time domain animation

영역에서의 해를 구할 때 불규칙 주파수(Irregular frequency)를 제거하지 않으면, 비물리적인 불규칙 주파수와 물리적인 공진에 의한 피크들을 구분하기가 쉽지 않아 본 연구에서는 불규칙 주파수를 미리 제거한 해를 사용한다. Fig. 6에서 액체화물이 없을 경우, Roll 공진주파수는 0.47rad/s이며, 이 경우 두 물체간의 간섭효과가 크게 나타나지 않았다. 액체화물의 높이가 18%인 경우, Roll RAO의 피크는 0.43rad/s와 0.61rad/s에서 갈라져 나타났다. Fig. 3의 LNG 운반선의 경우, 이러한 피크의 갈라짐 현상은 거의 나타나지 않았었다. 높은 주파수 영역의 두번째 피크는 액체화물의 가장 낮은 고유진동수에 의해 발생된 것이며 이때 고유진동수는 0.585rad/s였다. 두번째 피크로 인해, 0.6~0.7rad/s에서의 Roll RAO는 액체화물이 없는 경우에 비해, 현저히 증가하였으며, 이는 입사파 스펙트럼의 피크주기가 0.6~0.7rad/s에 있을 경우 LNG 운반선의 Rroll 운동이 슬로싱에 의해 현격하게 증가할 것임을 예측하게 해준다. 0.9rad/s 부근의 또 다른 피크값은 두 물체의 간섭효과에 의해 발생된 것으로 보인다. 액체화물의 높이가 56%인 경우 두 번째 피크는 18%에 비해 보다 낮은 값을 가지며 0.82rad/s에서 관찰되었으며, 이때 가장 낮은 슬로싱 모드 of 고유주기는 0.86rad/s였다. 그러나 높은 주파수에 위치한 두 번째 피크의 크기는 18%의 경우에 비해서는 크게 나타나지 않고 있다. 시간영역에서의 계산결과를 비교해 보면, 0.52rad/s 부근의 피크값의 크기는 LNG 운반선만 고려한 Fig. 3의 경우에 비해서는 다소 크게 나타났음을 알 수

있다.

시간영역에서의 계산을 수행하기 때문에 슬로싱 액체화물의 움직임과 부유체의 운동을 연속된 동영상으로 가공할 수 있으며, 이는 부유체의 운동에 의해 가진되는 액체화물의 거동과 함께 연성효과를 고려하여 계산된 부유체의 운동변위를 표현하게 되어 액체화물과 부유체의 운동이 연성된 물리적 현상을 이해하는데 보다 도움을 주게 된다. Fig. 7은 이러한 동영상중의 한 장면이다.

4. 결 론

본 연구에서는 선박의 운동과 액체화물 탱크 내 슬로싱의 상호 간섭효과를, 새롭게 개발된 포텐셜 점성 혼합형 시간영역 계산 프로그램을 통하여 검증하였다. 시간영역에서의 슬로싱 프로그램은 Navier Stokes 방정식을 풀고, SURF 방법을 이용해 점성, 비선형 자유표면을 고려하였다. 프로그램이 시간영역에서 시간에 따라 해를 풀어나가면서 슬로싱 프로그램은 선박의 운동 프로그램과 연성되어 슬로싱이 선박의 운동에 미치는 영향을 평가하였다. 액체화물탱크의 슬로싱 영향의 특징은 부가질량에 의한 관성의 증가와 복원력의 감소를 들 수 있다.

시간영역에서의 계산결과를 독립적으로 개발된 선형포텐셜이론을 이용한 주파수영역에서의 계산결과와 비교하였다. 비록 주파수 영역에서의 해석법은 선형 포텐셜 이론에 기반을 두고 있지만, 정성적인 간섭효과는 잘 관찰되었으며, 포텐셜 점성 혼합형 시간영역 계산법을 통해 실험값과 비교 했을 때보다 정량적으로 우수한 결과를 얻을 수 있었으며, 이는 슬로싱 현상의 점성과 자유표면 효과가 포함되어 있기 때문이다.

Roll 운동의 피크주파수는 슬로싱효과 때문에 이동하는 현상들이 관찰 되었다. 이때 연성으로 인해 추가되는 두 번째 피크들은 슬로싱 현상의 고유주기 부근에서 관찰 되었다. 옮겨진 피크값들은 특정 주파수 영역에서 선박의 운동을 증가시키는 것으로 나타났으며, 이러한 액체화물의 슬로싱과 선박운동의 간섭효과는 다물체의 경우에 보다 크게 나타났다.

후 기

이 연구는 OTRC(Offshore Technology Research Center)와 ABS(American Bureau of Shipping)의 지원 하에 이루어 졌음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

Cho, S.K., Choi, H.S., Sung, H.G., Hong, S.Y. and Park, I.R. (2009). "Numerical Studies of the Effect of Sloshing on Ship Motions", Proceedings of the 28th International

Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering, OMAE 2009, Honolulu, Hawaii, USA, pp 207-214
 Gaillard, G., Ledoux, A. and Lynch, M. (2004). "Coupling between Liquefied Gas and Vessel's Motion for Partially Filled Tanks: Effect on Seakeeping," Design & Operation of Gas Carriers, RINA, London, UK, pp 33-39.
 Kim, M.H., Ran, Z. and Zheng, W. (1999). "Hull/Mooring/Riser Coupled Dynamic Analysis of a Truss Spar in Time-Domain", Proc. 9th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, ISOPE, Brest, France, Vol 1, pp 301-308.
 Kim, Y. (2001). "Numerical Simulation of Sloshing Flows with Impact Load", Applied Ocean Research, Vol 23, pp 53-62.
 Kim, Y., Shin, Y., Lin, W. and Yue, D. (2003). Study on Sloshing Problem Coupled with Ship Motion In Waves, The 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea.
 Kim, Y., Nam, B.W., Kim, D.W. and Kim, Y.S. (2007). "Study on Coupling Effect of Ship Motion and Sloshing", J. Ocean Engineering, Vol 34, Issue 36, pp 2176-2187.
 Lee, C.H. (1995). WAMIT Theory Manual, MIT Report 95-2, Dept. of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
 Lee, S.J. (2007). The Effect of LNG-tank Sloshing on the Global Responses of LNG-carriers, Ph.D. Dissertation, Ocean Engineering Program in Dept. of Civil Engineering, Texas A&M University, USA.
 Lee, S.J., Kim, M.H., Lee, D.H. and Shin, Y.S. (2007). "The Effects of Tank Sloshing on LNG-ship Responses", Proc. 26th Int. Offshore Mech. and Arctic Eng. Conference, San Diego, USA, pp 1-7.
 Malenica, Š., Zalar, M. and Chen, X.B. (2003). "Dynamic Coupling of Seakeeping and Sloshing", Proc. 13th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, Hawaii, USA, pp 486-492.
 Molin, B., Remy, F., Rigaud, S. and de Jouette, Ch. (2002). "LNG-FPSO's: Frequency Domain, Coupled Analysis of Support and Liquid Cargo Motion", Proceedings IMAM Conf., Rethymnon, Greece, pp 1-8.
 Newman, J.N. (2005). Wave Effects on Vessels with Internal Tanks, 20th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Spitsbergen, Norway.

2010년 8월 17일 원고 접수
 2010년 10월 1일 심사 완료
 2010년 10월 2일 게재 확정